

# 水稲栽培における営農型太陽光発電の実証と モデルシミュレーション

東京大学大学院 新領域創成科学研究科 環境システム学専攻 (2016年3月修了予定)

47-146688 本間優 指導教員：吉田好邦教授

キーワード：営農型太陽光発電，ソーラーシェアリング，SIMRIW，水稲栽培，遮光，

## 1. はじめに

2013年4月1日に農林水産省により公表された通知<sup>1)</sup>により，農地で限定的ながら，太陽光発電設備を導入することが可能になった．農林水産省は設置にあたり「太陽光パネル下で栽培した農作物の収量減少率20%以下で，かつ品質劣化が著しくないこと」という基準を設定しており，この基準を満たす場合に限り，太陽光発電設備の導入を許可している．本研究では，農地に上記の発電施設を備えた設備群を「営農型太陽光発電」と呼ぶ．日本語ではソーラーシェアリングと呼称されているが，英名はDupraz et al.<sup>2)</sup>でAgrivoltaic systemsと呼称されているため，これと区別する．

2016年2月現在，営農型太陽光発電の普及状況は全国で100件弱と，あまり普及していない．この現状は，太陽光パネル設置後の遮光条件がもたらす農作物の減収，また品質劣化についての見通しが立たない点に起因している．太陽光発電設備の設置後に，農林水産省が公表した基準を満たすことができない場合には，太陽光発電設備の撤去が求められるため，遮光条件下で栽培した農作物生育状況の知見不足が課題となっている．

ゆえに，営農型太陽光発電の普及を促進するためには前提条件として，遮光条件と農作物耐陰性間の知見を蓄積する必要がある．しかし遮光条件と農作物生育状況の関係について検討をおこなった研究例は極めて少ない．例えば，ライフサイクル全体を通じた遮光条件による水稲の減収・品質劣化についての研究は，谷ら<sup>3)</sup>で一部が検討されているに過ぎない．

以上の背景から，本研究では水稲栽培における営農型太陽光発電の実証試験を行い，遮光条件下での生育状況を解明する．また実証試験で得られた結果を基にモデルシミュレーションを実施することで，遮光条件

と水稲生育状況の定量的な関係性と経済性について検討することを目的とする．

## 2. 実証試験の概要

千葉県酒々井町に設置した実証サイトにて実証試験を実施した．対象作物は水稲（品種；コシヒカリ），栽培期間は2015年5月2日から9月14日（19週齢）である．実証試験場の風景を図1に示す．本実証試験では，太陽光パネル下の気象要素について検討するため，日射量と気温を計測した．その際には，日射計（ソーラーパワーメーターSPM-SD；佐藤商事）と温度計（おんどとり；ティアンドデイ）を利用した．計測装置の画像を図2に示す．



図1. 酒々井町実証サイトの風景



図2. 計測装置の内観  
(左下：温度計，右上：日射計)

実証サイトの俯瞰図を図3に示す。計測装置は図3のように、合計8ヶ所に設置した。営農型太陽光発電設備の南側（非遮光区）に2ヶ所、北側（中遮光区）に4ヶ所、南側と北側間の中央（強遮光区）に1ヶ所、設備外の対照区に1ヶ所の計8ヶ所とした。

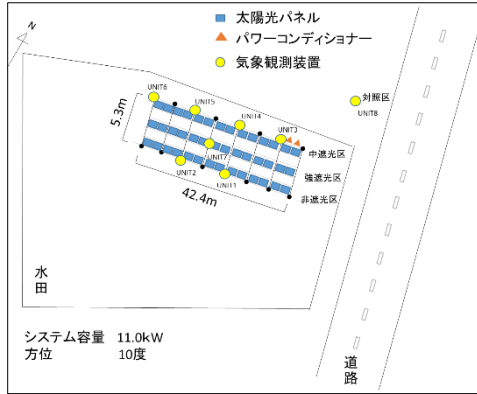


図3. 酒々井実証サイトの俯瞰図

また気象計測を行うと共に、生育調査項目（草丈、SPAD値（葉緑素含量を示す値）、穂数）を設定し、2015年7月26日と9月1日の2回、生育調査を実施した。7月26日の調査時には営農型太陽光発電設備の南側（非遮光区）から5ヶ所、北側（中遮光区）から5ヶ所、計10サンプルの水稲生育状況を調査した。7月26日の調査時は水稲の出穂期であったため、生育調査時に設定した調査項目に加え、出穂茎数を調査項目に加えた。

9月1日の調査時には南側（非遮光区）から12サンプル、北側（中遮光区）から

12サンプル、南側と北側間の中央（強遮光区）から10サンプルの、合計で34サンプルの水稲生育状況を調査した。また生育調査後は重量分析のため、サンプルを収集した。重量分析の後に、収集したサンプルから遮光条件下での品質劣化について検討するため、株式会社サタケに米粒外観形質分析を依頼した。

### 3. 実証試験の結果

#### 3.1 水稲生育調査

表1は1回目（7/26）の水稲生育調査の結果である。太陽光パネル下の中遮光区では、出穂茎数に有意な差が認められ、遮光による出穂遅延の可能性が示唆された ( $p < 0.05$ )。

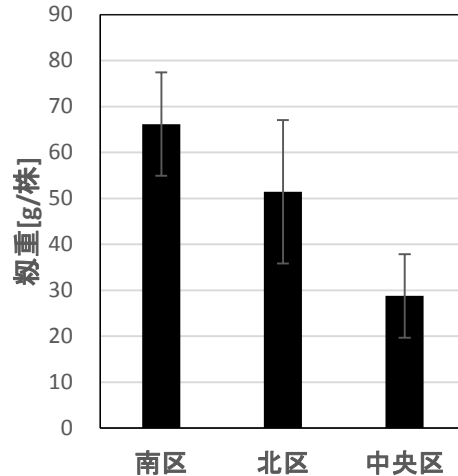


図4. 各試験区間で比較した1株あたりの籾重量

表1. 1回目（7/26）の水稲生育調査の結果

|           | 全体(n=10) |      | 北区(n=5) |      | 南区(n=5) |      | t値    | ** p<0.01<br>* p<0.05<br>n.s. 有意差なし |
|-----------|----------|------|---------|------|---------|------|-------|-------------------------------------|
|           | 平均値      | 標準偏差 | 平均値     | 標準偏差 | 平均値     | 標準偏差 |       |                                     |
| 草丈[cm]    | 113.9    | 4.0  | 113.8   | 2.2  | 114.0   | 1.7  | -0.07 | n.s.                                |
| 穂数[穂/株]   | 25.0     | 5.5  | 27.4    | 1.2  | 22.6    | 3.3  | 1.37  | n.s.                                |
| SPAD値     | 41.2     | 4.2  | 39.9    | 2.2  | 42.5    | 1.8  | -0.90 | n.s.                                |
| 出穂茎数[穂/株] | 5.0      | 4.6  | 8.2     | 2.0  | 1.8     | 1.1  | 2.79  | *                                   |

表2. 2回目（9/1）の水稲生育調査の結果

|         | 全体(n=34) |      | 北区(n=12) |      | 南区(n=12) |      | 中央区(n=10) |      | ** p<0.01<br>* p<0.05<br>n.s. 有意差なし |
|---------|----------|------|----------|------|----------|------|-----------|------|-------------------------------------|
|         | 平均値      | 標準偏差 | 平均値      | 標準偏差 | 平均値      | 標準偏差 | 平均値       | 標準偏差 |                                     |
| 草丈[cm]  | 118.0    | 6.3  | 120.6    | 1.8  | 118.3    | 0.6  | 114.5     | 1.8  | n.s.                                |
| 穂数[穂/株] | 22.3     | 7.7  | 22.5     | 1.4  | 28.3     | 0.8  | 14.8      | 1.4  | **                                  |
| SPAD値   | 36.3     | 2.8  | 38.1     | 1.8  | 35.2     | 0.8  | 35.4      | 1.6  | *                                   |

表2は2回目(9/1)の水稻生育調査の結果である。草丈は太陽光パネルの内外に問わず、調査を通じて有意な差は確認されなかった。一方、SPAD値と穂数では有意な差が確認され、特に穂数が遮光区で大きく減少していた。統計的に有意であり、生育初期の遮光条件が、穂数の減少を生じさせたと考えられる(p<0.01)。

1株あたりの籾重計測結果である図4から、太陽光パネル下の遮光区では、水稻の籾重が有意に少ないという結果が得られた。(p<0.01)。この減収には、穂数の減少が大きく寄与している点が確認できた。

### 3.2 米粒外観形質分析

米粒外観形質分析の結果は表3より、太陽光パネル区では不完全米(死米、乳白米、青未熟米)において有意な増加が確認できた(p<0.01)。一方、胴割米や着色米は遮光区間での優位な変動が確認できなかったため、これらの項目は、日射量の多寡に影響されない可能性が高いと思われる。

実証試験の結果をまとめると、太陽光パネル下の遮光区では前項で明らかにした減収に加え、不完全米(死米、乳白米、青未熟米)の有意な増加による水稻品質劣化が生じていた。

表3. 米粒外観分析の結果

| 調査項目 | 詳細項目   | 平均値(g/全精米重) |         |          | ** p<0.01<br>* p<0.05<br>n.s. 有意差なし |
|------|--------|-------------|---------|----------|-------------------------------------|
|      |        | 北(n=12)     | 南(n=12) | 中央(n=10) |                                     |
| 整粒米  | 整粒     | 71.7        | 66.8    | 65.4     | *                                   |
| 胴割米  | 胴割粒    | 0.1         | 0.0     | 0.1      | n.s.                                |
| 未熟米  | 乳白粒    | 3.7         | 6.3     | 9.1      | **                                  |
|      | 基部未熟粒  | 4.1         | 1.6     | 2.5      | **                                  |
|      | 腹白未熟粒  | 1.2         | 0.9     | 1.0      | n.s.                                |
|      | 青未熟粒   | 1.2         | 3.7     | 1.6      | **                                  |
|      | その他未熟粒 | 14.9        | 15.5    | 12.6     | n.s.                                |
| 着色米  | 全面着色粒  | -           | -       | -        | -                                   |
|      | 部分着色粒  | 0.5         | 0.6     | 0.3      | n.s.                                |
|      | 赤粒     | -           | -       | -        | -                                   |
| 被害米  | 碎粒     | 0.2         | 0.4     | 0.5      | **                                  |
|      | 発芽粒    | -           | -       | -        | -                                   |
|      | 芽腐れ粒   | -           | -       | -        | -                                   |
|      | 茶粒     | 0.6         | 0.2     | 0.1      | *                                   |
|      | 斑点粒    | -           | -       | -        | -                                   |
|      | 虫害粒    | -           | -       | -        | -                                   |
|      | 病害粒    | -           | -       | -        | -                                   |
|      | 奇形粒    | 1.1         | 0.8     | 1.4      | *                                   |
|      | その他被害粒 | -           | -       | -        | -                                   |
|      | 死米     | 青死粒         | 0.5     | 2.7      | 4.9                                 |
| 白死粒  |        | 0.4         | 0.6     | 1.3      | **                                  |

### 4. モデルの紹介

本研究では、農作物の収量を推定する作物モデルと、太陽光パネルの発電量を推定する発電量予測モデルを結合させること

で、営農型太陽光発電のシミュレーションを実施する。

作物モデルは堀江<sup>4)</sup>が開発した各日の気象データから生育状況を模倣することで水稻収量を推定するSIMRIW(Simulation Model for Rice-Weather Relations)を利用する。ただし、SIMRIWは遮光条件による減収を正確に再現できないため、本実証試験から得られた生育調査結果を利用することにより、モデル式を一部修正した。また発電量予測モデルについては、吉田研究室で好井<sup>5)</sup>が開発したモデルを利用する。

## 5. シミュレーション結果

### 5.1 遮光条件による減収効果

遮光条件を変化させた場合の水稻収量が図5である。ここで横軸の投影率とは、「営農型太陽光発電設備の設置面積に占める、太陽光パネル設置面積の割合」として定義される。定義から投影率が1に近づくほど遮光条件が強まる。

シミュレーション結果から、20%の投影率では、約20%の水稻収量が減少するという結果が得られた。

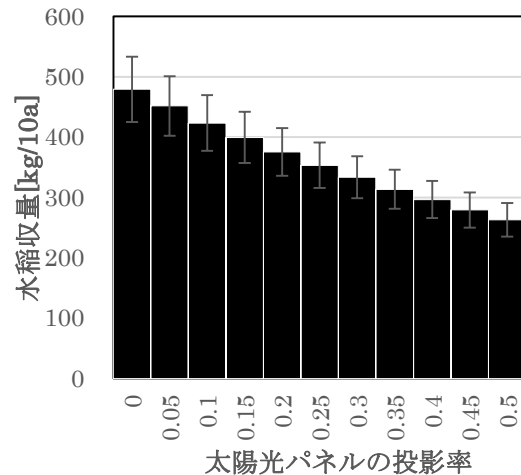


図5. 投影率に応じた水稻収量

### 5.2 異なる遮光時期による減収構成割合

遮光条件を課すことによる減収効果をより詳細に検討するためにも、この減収は、どの時期の遮光条件により生じたかを明らかにする必要がある。

移植日と設定した5月5日から出穂日である8月初旬までの遮光を「生育初期の遮

光条件」，出穂日の8月初旬から収穫日の9月中旬までの遮光を「生育後期の遮光条件」として，これら2パターンの遮光条件を組み合わせ，遮光時期をずらして生育させた場合のシミュレーションを実施した．シミュレーション結果である図6から，生育初期の遮光条件が，減収量全体の85%弱を占めていることがわかった．ここから，生育初期の日照条件を改善することの重要性が示唆される．

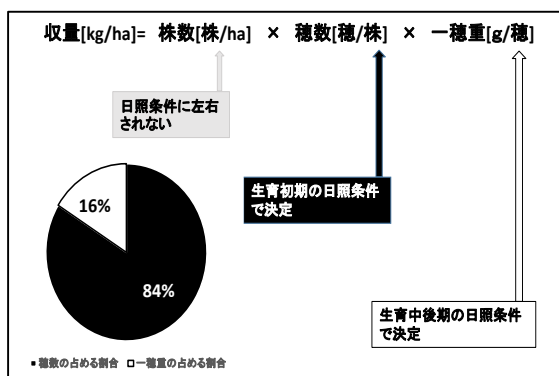


図6. 減収量に占める穂数と一穂重の構成割合

### 5.3 キャッシュフローの推定

水稻収量が推定可能なSIMRIWと，発電量推定モデルを結合し，キャッシュフローを推定する．ここで売電価格は調達価格等算定委員会の資料<sup>6)</sup>を参考にした．またコストは資源エネルギー庁<sup>7)</sup>を参考にした．営農型太陽光発電の栽培面積は15[ha]，移植日は5月5日，パネルの方位は0[°]，設置角度は30[°]と想定した．

減収量が20%となる投影率における，1月から12月までの各月のキャッシュフローを推定した結果が図7である．シミュレーションの結果から，「遮光条件による減収量が20%以下」という農林水産省の規定内であるならば，経済性の観点から，営農型太陽光発電の優位性が確保できた．

### 6. 結論

営農型発電設備下の遮光された環境で生育させた水稻には，減収に加えて品質劣化が生じていた．20%の投影率で約20%の減収が生じているため，現行普及している35%弱の投影率は，水稻栽培に関しては過度な遮光条件であると考えられる．

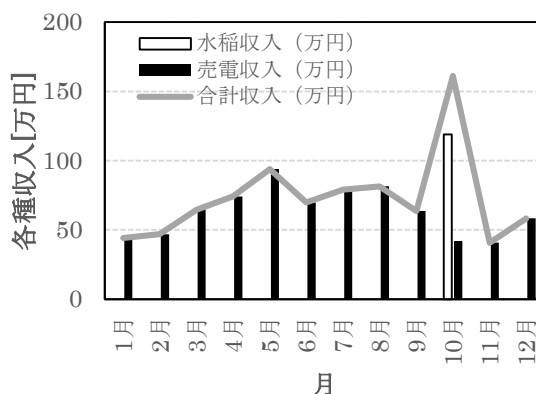


図7. 営農型太陽光発電のキャッシュフロー

また水稻の減収は，穂数の減少による寄与が大きいため，水稻を対象とした営農型太陽光発電では，穂数が決定される生育初期の日照条件を改善するような措置が必要と推察される．

水稻栽培農家が営農型太陽光発電設備を導入した場合，遮光条件による減収により水稻収入は減少する．その一方，売電収入の増加により水稻収入の減少分が補完されるため，農林水産省の規定内であるならば，営農型太陽光発電は経済的に優位という結論が得られた．

### 参考文献

- 1) 農林水産省；支柱を立てて営農を継続する太陽光発電設備等についての農地転用許可制度上の取扱いについて，2014.
- 2) C. Dupraz, et al. ; Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: towards new agrivoltaic schemes, Renewable Energy, 36 (2011), pp. 2725-2732.
- 3) 谷 晃，管 敬，坂見 拓也；営農継続型太陽光発電におけるイネの生育と微気象環境，2015 年生態工学会年次大会発表論文集，(2015), pp. 43-44.
- 4) T. Horie; The rice crop simulation model SIMRIW and its testing, Modelling the Impact of Climate Change on Rice in Asia, 1995, pp. 51-66.
- 5) 好井宏明；時系列分析を用いたメガソーラーにおける天候デリバティブの評価，東京大学修士論文，(2015)，pp. 1-102.
- 6) 経済産業省 調達価格等算定委員会（第20回）- 配布資料；再生可能エネルギーの導入状況と固定価格買取制度見直しに関する検討状況について，2016.
- 7) 資源エネルギー庁；最近の太陽光発電市場の動向及び前回のご指摘事項について，2014.